

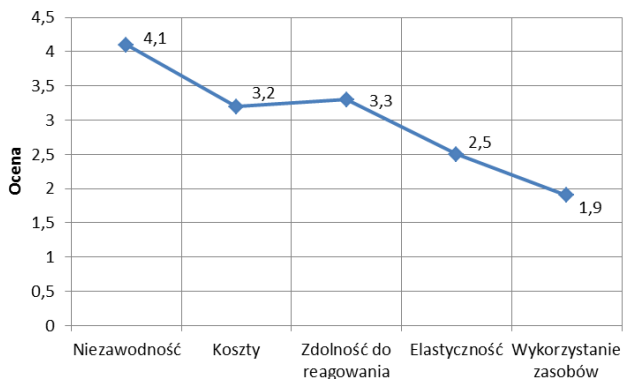
## OCENA NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU TRANSPORTOWEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY DYNAMICZNEGO DRZEWA NIEZDATNOŚCI

W przedstawionej pracy zwrócono uwagę na potrzebę modelowania systemów transportowych w aspekcie oceny ich niezawodności. Uwzględnienie zależności czasowych między elementami systemu transportowego w celu dokładniejszego odzwierciedlenia warunków rzeczywistych wymaga dokonania wyboru właściwej metody analizy. Jedną z takich metod jest metoda dynamicznego drzewa niezdatności (DFTA), która opiera się na klasycznej metodzie drzewa niezdatności (FTA), uzupełnionej o bramki logiczne z zależnościami czasowymi. Z uwagi na skomplikowane procedury obliczeniowe, metoda DFTA jest trudna do zastosowania w ujęciu analitycznym. Z tego też powodu korzysta się m.in. z technik symulacyjnych, takich jak np. symulacja Monte Carlo. Jest ona często stosowana w ocenie niezawodności obiektów technicznych, jednak w przypadku systemów o wysokim stopniu złożoności wspierana dodatkowo przez specjalistyczne oprogramowanie komputerowe. Niniejsza praca dotyczy oceny niezawodności przykładowego systemu transportowego, którego model stanowi dynamiczne drzewo niezdatności. Za pomocą symulacji Monte Carlo wyznaczono wybrane miary, mogące służyć do oceny niezawodności. Realizację procedury obliczeniowej wykonano przy pomocy oprogramowania firmy Reliasoft.

### WSTĘP

Jednym z podstawowych celów związanych z właściwym funkcjonowaniem systemów transportowych jest dążenie do zapewnienia możliwie najwyższego poziomu niezawodności na każdym etapie realizacji procesu transportowego. Dostępne w literaturze wyniki badań pokazują, że taka prawidłowość zachodzi niezależnie od profilu działalności przedsiębiorstwa (rys. 1).

Niezawodność obiektów technicznych należy traktować jako kompleksową właściwość obejmującą takie cechy jak: nieuszkodzalność, gotowość i podatność utrzymaniową. Dla systemów transportowych jest ona również jednym z czynników gwarantujących jego konkurencyjność i obejmuje m. in. takie parametry jak: dokładność dostaw, kompletność dostaw oraz terminowość dostaw. Niezawodność systemu transportowego może być oceniana za pomocą wybranych miar (wskaźników). Wyrażają one stopień pewności w jakim świadczona usługa zostanie wykonana w sposób właściwy. [4,5].



Rys. 1. Główne cele logistyki – handel [10]

Z uwagi na wysoki stopień złożoności rzeczywistych systemów transportowych, między ich elementami zachodzą dynamiczne zmiany stanów technicznych, co w modelowaniu systemów trans-

portowych wymaga zastosowania odpowiednich technik w analizie niezawodności. Do klasycznych technik niezawodności należą: strukturalna analiza niezawodności i analiza drzewa niezdatności (FTA). Techniki te są z powodzeniem implikowane do zastosowań przemysłowych i zyskały powszechne uznanie dla oceny niezawodności systemów technicznych, w tym systemów transportowych [11].

Analiza drzewa niezdatności jest techniką analitycznej oceny niezawodności, przedstawiająca w sposób graficzny zbiór niezależnych zdarzeń lub procesów, których określona kombinacja prowadzi do występowania niepożądanych zdarzeń. Technika ta jest narzędziem do ilościowej i jakościowej oceny niezawodności, opiera się na algebrze Boole'a i pozwala wyznaczyć prawdopodobieństwo występowania zdarzeń krytycznych. Technika FTA, podobnie jak inne narzędzia analityczne ma jednak jedną poważną wadę, związaną z jej zastosowaniem w przypadku systemów, w których występuje dynamiczna nadmiarowość strukturalna (np. struktura z rezerwą obciążoną, struktura z rezerwą przesuwającą się). Dodatkowym utrudnieniem jest brak możliwości modelowania zdarzeń, których tylko określona sekwencja występowania może spowodować niezdatność systemu. Aby pozbyć się tych ograniczeń, wprowadzono technikę dynamicznego drzewa niezdatności (DFTA), która stanowi rozszerzenie struktury klasycznego drzewa (FT) o kilka dodatkowych bramek logicznych [1, 2, 6, 17].

Rozwiązywanie dynamicznego drzewa niezdatności nie może odbywać się przy użyciu technik analitycznych. W tym przypadku proponowane są najczęściej dwie metody: modele Markova i metoda symulacji Monte Carlo. Pierwsza z nich może być zastosowana tylko wtedy, gdy elementy systemu technicznego posiadają wykładnicze rozkłady czasu do uszkodzenia i czasu odnowy. Ponadto, w przypadku złożonego systemu o dużej liczbie elementów, przestrzeń stanów w procesie Markova komplikuje procedurę obliczeniową. Z tego też względu chętnie wykorzystywana jest metoda symulacji Monte. Pozwala ona wyznaczyć wybrane miary, służące do oceny niezawodności system, poprzez dyskretną symulację czasu poprawnej pracy. [3, 6, 7].

## 1. MODELOWANIE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW TRANSPORTOWYCH

Zagadnienie modelowania i oceny niezawodności systemów transportowych jest podejmowane w wielu pracach naukowych. Wynika to z potrzeby ograniczenia występowania niepożądanych zdarzeń i zwiększenia efektywności funkcjonowania tych systemów. System transportowy jest systemem złożonym, którego funkcyjne wskaźniki niezawodności zmieniają się w sposób dynamiczny na każdym etapie realizacji procesu przemieszczania ładunku [7, 8, 10, 12, 16].

Analiza klasycznego drzewa niezdatności polega na stworzeniu zbioru Boolean equations, związanych z występowaniem niepożądanych zdarzeń w systemie technicznym. Pomimo wielu ograniczeń tej metody nadal jest ona stosowana w wielu przypadkach. Przykładem jest praca [15]. Z kolei, w pracy [3] autorzy przeprowadzili studium przypadku dla systemu regulacji reaktora jądrowego. Rozwiązywanie dynamicznego drzewa niezdatności odbyło się za pomocą symulacji Monte Carlo.

W niektórych pracach, technika FTA wykorzystywana jest do oceny ryzyka związanego z występowaniem zagrożeń dla poprawnego funkcjonowania systemów technicznych. Przedstawiane są przykłady zastosowania symulacji Monte Carlo jako użytecznej metody do oceny ryzyka wypadków w transporcie lotniczym. Metodę zastosowano do generowania alertów dla kontrolerów ruchu o możliwej kolizji samolotu kołującego na pasie startowym oraz samolotu rozpoczynającego fazę wznoszenia na tym samym pasie [14].

W celu wyeliminowania ograniczeń analizy drzewa niezdatności, opracowywane są nowe techniki, będące rozszerzeniem wspomnianej techniki. Jedną z nich nazywana „Timed Fault Trees” (TFTs) pozwala na identyfikację zdarzeń, które powinny być natychmiast wyeliminowane. Dzięki technice TFTs możliwe jest również wyznaczenie czasu potrzebnego na czynności związane z utrzymaniem. Przykład zastosowania techniki TFTs przedstawiono dla prostego systemu transportu kolejowego [13].

Do budowy modelu systemów transportowych wykorzystuje się również sieci Petriego. Przykład zastosowania tej metody dotyczy analizy niezawodności i wydajności funkcjonowania rzeczywistego systemu komunikacji tramwajowej. Jak wynika z przeprowadzonych badań, modele oparte na sieciach Petriego mogą również uwzględnić zależności czasowe [9].

## 2. OPIS ANALIZOWANEGO SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

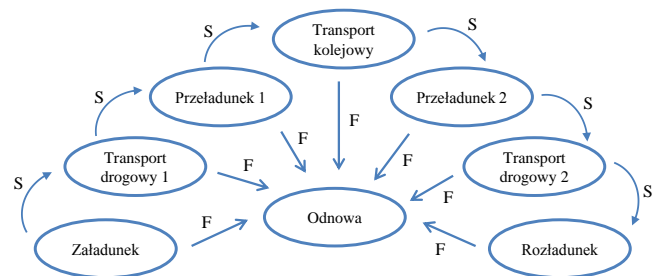
### 2.1. Funkcjonowanie systemu transportowego

Analizowany w niniejszej pracy przykład systemu transportowego pokazano na rys. 2. Jest to system transportu intermodalnego, składający się z kilku podsystemów, w którym różne środki transportu (bliskiego, drogowego, szynowego) wykonują odrębne zadania transportowe. Istotnym założeniem warunkującym wymagany poziom niezawodności systemu transportowego jest przyjęcie liczby elementów rezerwowych. Przyjęto, że każdy podsystem składa się z dwóch takich samych środków transportu, przy czym jeden z nich stanowi rezerwę nieobciążoną. Są to obiekty naprawialne, które podlegają ściśle określonym działaniom, związanym z przywróceniem im stanu zdatności.

Analiza niezawodności systemu transportu powinna uwzględniać nie tylko czas naprawy niezdatnych elementów ale także czas opóźnienia, który związany jest z oczekiwaniem na podstawienie obiektu rezerwowego. Realizacja poprawnej pracy systemu wymaga,

aby zostały zrealizowane wszystkie jego poszczególne jego procesy częściowe tj.:

- załadunek: uformowanie jednostki ładunkowej i przygotowanie do transportu drogowego,
- transport drogowy 1: transport jednostki ładunkowej do terminala kolejowego,
- przeładunek 1: przeładunek jednostki ładunkowej na środek transportu kolejowego,
- transport kolejowy: transport jednostki ładunkowej do najbliższego terminala w otoczeniu odbiorcy,
- przeładunek 2: przeładunek jednostki ładunkowej na środek transportu drogowego,
- transport drogowy 2: transport jednostki ładunkowej do miejsca docelowego,
- rozładunek: rozładunek jednostki ładunkowej i zakończenie procesu transportu.

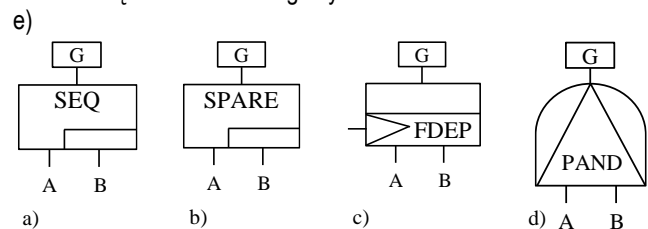


Rys. 2. Schemat funkcjonowania systemu transportowego; S – zdadność, F – niezdatność [10]

### 2.2. Struktura dynamicznego drzewa niezdatności systemu transportowego

Wykonanie modelu przedstawionego systemu transportu za pomocą drzewa niezdatności i uwzględnienie opisanych wcześniej założeń wymaga zastosowania bramek z zależnościami czasowymi. Należą do nich m. in. SEQ, SPARE, PAND FDEP, które pokazano na rys. 3. Znaczenie poszczególnych bramek jest następujące [17]:

- SEQ: przyjmuje stan niezdatności jedynie w przypadku, gdy wszystkie elementy systemu przejdą do stanu niezdatności w konkretnej sekwencji. Każda inna sekwencja nie jest możliwa,
- SPARE: przyjmuje stan niezdatności, gdy liczba aktywnych elementów system jest mniejsza niż wymagana ich liczba,
- FDEP: jest wykorzystywana w przypadku, gdy element systemu są funkcjonalnie zależne od określonych czynników zewnętrznych,
- PAND: przyjmuje stan niezdatności, gdy wszystkie elementy systemu przejdą do stanu niezdatności w konkretnej sekwencji. W porównaniu do bramki SEQ, w bramce PAND dopuszcza się możliwość wystąpienia innej kolejności ale nie wpływa ona na zmianę stan technicznego systemu.



Rys. 3. Dynamiczne bramki drzewa niezdatności: a) SEQ, b) SPARE, c) FDEP, d) PAND

Model drzewa niezdatności rozpatrywanego systemu transportowego jest przedstawiony na rys. 4. System transportowy przejdzie do stanu niezdatności jeżeli w dowolnym, częściowym procesie transportu niezdatne będą dwa środki transportu jednocześnie (zgodnie z określoną sekwencją). W chwili przejścia pojazdu podstawowego do stanu niezdatności, następuje wstrzymanie realizacji procesu transportu i oczekiwanie na podstawienie pojazdu rezerwowego. W tym czasie, niezdatny pojazd jest poddawany odnowie. Wykonanie odnowy oznacza przywrócenie pojazdowi pełnego zasobu pracy możliwej do wykonania.

### 3. ANALIZA NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

#### 3.1. Założenia

W analizowanym systemie transportowym, elementy systemu posiadają rozkład normalny czasu poprawnej pracy (TTF) i lognormalny rozkład czasu trwania odnowy (TTR). Uwzględniony został czas opóźnienia (MDT), związany z podstawieniem elementów rezerwowych. Szczegółowe dane zawarto w tab. 1.

Tab. 1. Dane do analizy

Element	Czas poprawnej pracy		Parametry [godz.]	Parametr [godz.]	Czas opóźnienia	
	Rozkład	Parametry [godz.]			Parametr [godz.]	Parametr [godz.]
		$\mu$	$\sigma$	MTTR		
W1, W2	NORMALNY	60	5	2		2
PD1, PD2	NORMALNY	95	5	4		4
W3, W4	NORMALNY	70	6	2		2
PS1, PS2	NORMALNY	187	11	6		6
W5, W6	NORMALNY	65	5	2		2
PD3, PD4	NORMALNY	100	10	4		4
W7, W8	NORMALNY	55	7	2		2

#### 3.2. Symulacja Monte Carlo

Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano pakiet oprogramowania firmy Reliasoft's, który umożliwia prowadzenie dyskretnej symulacji Monte Carlo. Oprogramowanie to jest powszechnie wykorzystywane do wielu przemysłowych zastosowań. Dostępna w procesie obliczeniowym pakietu symulacja Monte Carlo opiera się na algorytmie RNG z podwójnym tasowaniem Baysa-Durhama. Wymaga ona wprowadzenia pewnych parametrów wejściowych, takich jak:[18]

- czas trwania symulacji,
- krok obliczeniowy,
- liczba symulacji.

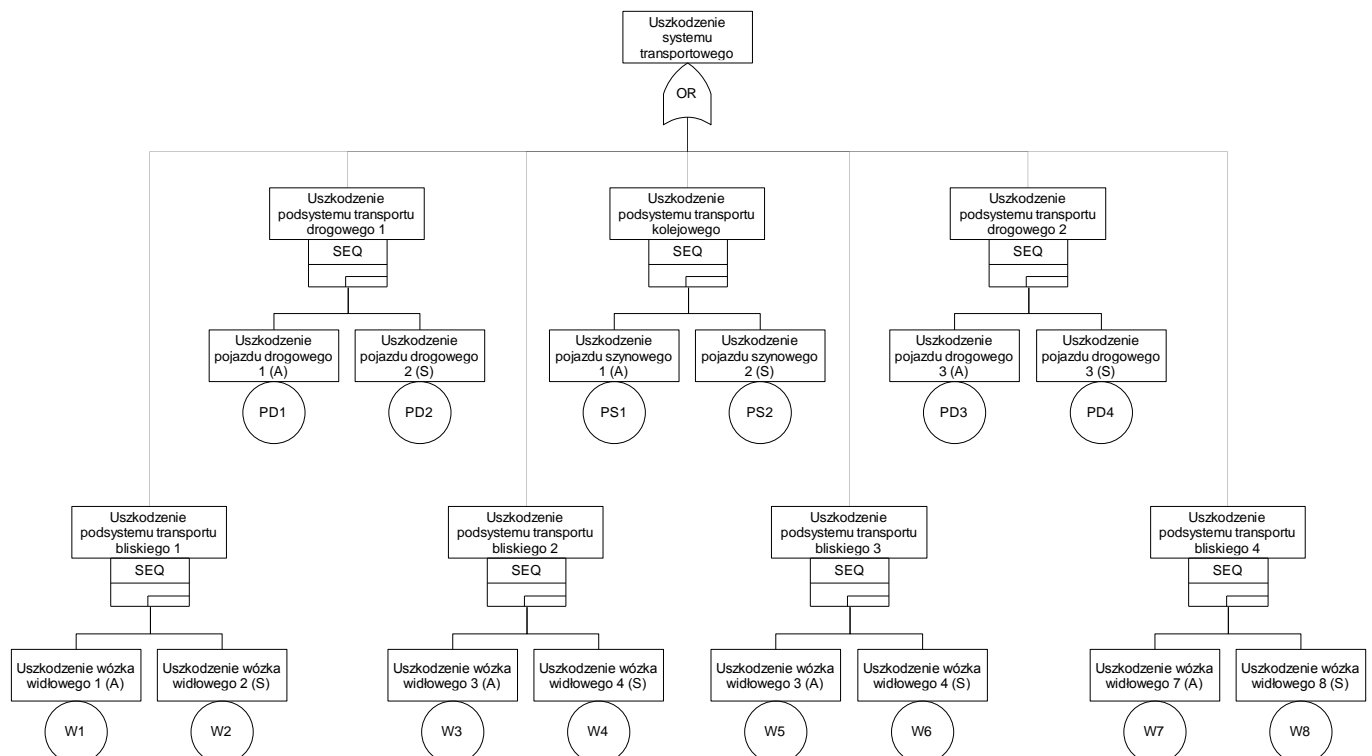
#### 3.3. Wyniki obliczeń

Otrzymane wyniki obliczeń dotyczą analizowanego okresu eksploatacji, wynoszącego 1825 dni, kroku obliczeniowego – 1 dzień oraz liczby symulacji równej 100000. Wybrane wielkości charakteryzujące niezawodność systemu transportowego zostały ujęte w tab. 2.

Tab. 2. Ogólne wyniki symulacji czasu pracy systemu

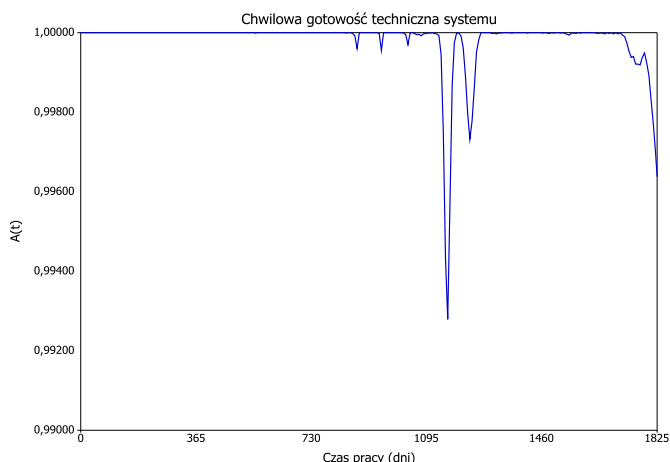
Średnia gotowość techniczna:	0,9996
Odchylenie standardowe średniej gotowości technicznej:	0,000147
Chwilowa gotowość techniczna, A(t) = 1825 (dni):	0,9964
Spodziewana liczba niezdatności dla t = 1825 (dni):	2,3691
Odchylenie standardowe spodz. liczby niezdatności:	0,5940
Średni czas do pierwszego uszkodzenia MTTF (dni):	1148,7
Średni czas między uszkodzeniami MTBF (dni):	770,3
Średni czas między wszystkimi zdarzeniami MTBE (dni):	543,3
Łączny czas zdatności (dni):	1824,4
Łączny czas przeznaczony na obsługę bieżącą (dni):	0,5992

Poniżej, na rys. 5 przedstawiono wykres chwilowej gotowości systemu transportowego. Na podstawie otrzymanych wyników, można stwierdzić, że dla branego pod uwagę systemu, w pewnych



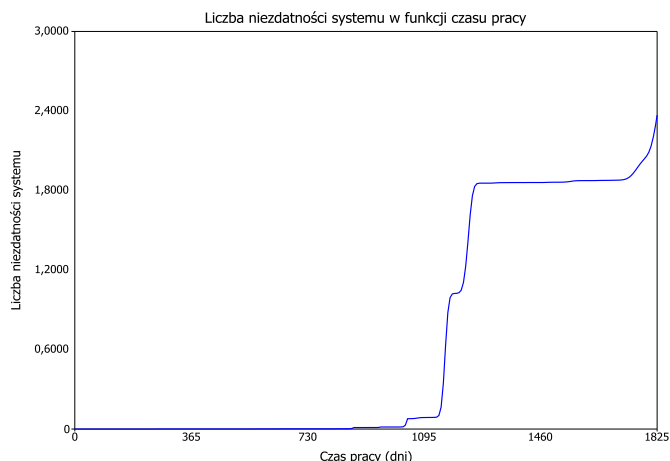
Rys. 4. Model dynamicznego drzewa niezdatności rozpatrywanego systemu transportowego: A – pojazd podstawowy, S – pojazd rezerwowy

odstępach czasu następuje wyraźny spadek chwilowej gotowości technicznej tego systemu. Największy spadek wartości  $A(t)$  obserwowany jest po czasie pracy wynoszącym ok. 1160 dni.



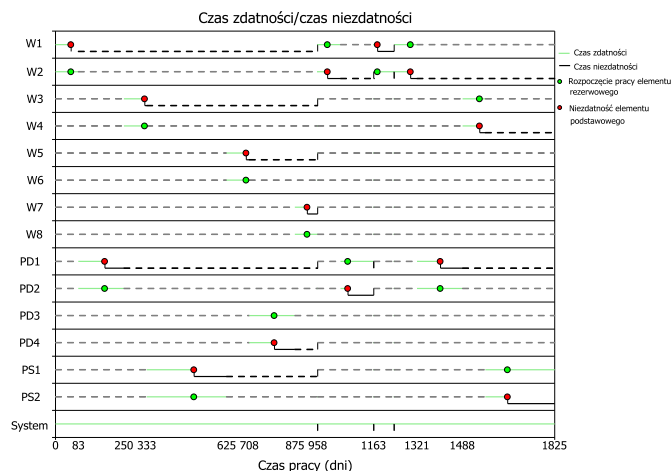
Rys. 5. Wykres chwilowej gotowości systemu

Rys. 6 przedstawiono wykres liczby niezdatności systemu w zależności od czasu pracy. W okresie eksploatacji między 0 a 1030 dni wartość liczby niezdatności jest bliska zeru i zagrożenie dla stabilnego funkcjonowania systemu jest niewielkie. Sytuacja zmienia się diametralnie, po przekroczeniu ok. 1140 dni czasu pracy, po którym liczba niezdatności systemu gwałtownie wzrasta, do wartości ok. 2. Po tym czasie następuje ponowna stabilizacja, natomiast po czasie 1260 dni, liczba niezdatności ponownie wrasta aż do osiągnięcia wartości 2,3691 dla opowiadającej wartości czasu zakończenia eksploatacji. Opisane gwałtowne zmiany liczby niezdatności systemu w poszczególnych przedziałach czasu pracy w pełni odzwierciedlają spadki chwilowej gotowości technicznej w podobnych interwałach czasowych.



Rys. 6. Wykres liczby niezdatności systemu w funkcji czasu pracy

Rys. 7 przedstawia przedziały czasu zdatności i czasu przestoju poszczególnych elementów oraz ich wpływ na system. Na poniższym wykresie widoczne są punkty na osi czasu (kolor zielony i kolor czerwony), odpowiadające przejęciu pracy niezdatnych elementów podstawowych przez elementy rezerwowe dla poszczególnych procesów częściowych transportu.



Rys. 7. Wykres czasu zdatności/czasu niezdatności systemu i jego elementów

Analizując udział zdarzeń powodujących przestój oraz spodziewaną liczbę niezdatności systemu transportowego, można wskazać słabe ogniwa tego systemu w założonym okresie eksploatacji. W tym celu posłużono się wskaźnikami: [18]

- RS DECI – wskaźnik wrażliwości systemu na elementy, powodujące jego przestój,
- RS FCI – wskaźnik wrażliwości systemu na elementy, powodujące jego niezdatność.

RS DECI jest względną miarą, ukazującą procentowy udział przestoju dla poszczególnych elementów w odniesieniu do przestoju systemu w analizowanym okresie eksploatacji. Jest on wyrażony równaniem:

$$RS\ DECI = \frac{C_{NSDE}}{N_{ALLdown}}$$

gdzie:

- $C_{NSDE}$  – liczba przestojów systemu spowodowana przestojem danego elementu.
- $N_{ALLdown}$  – liczba wszystkich przestojów systemu.

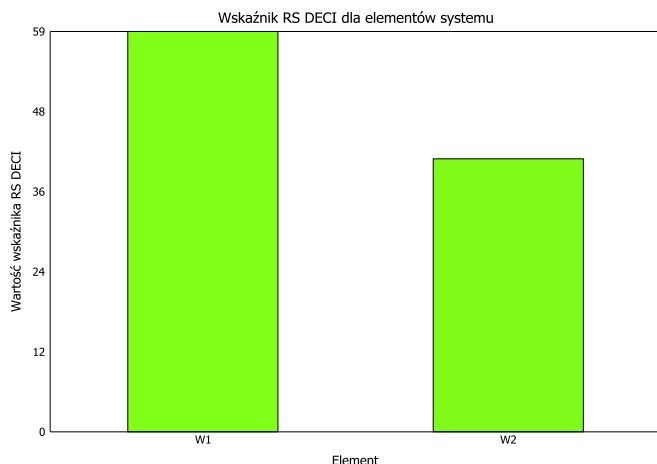
Z wyznaczonego wykresu RS DECI (rys. 8) można odczytać, wartość wskaźnika RS DECI dla elementu W1, która jest równa 59%. Oznacza to, że udział przestoju dla tego elementu w skali systemu wynosi 59%. Ponadto z przeprowadzonej analizy wynika, że znaczący wpływ na czas przestoju przestój systemu ma także element W2, dla którego wartość wskaźnika RS DECI wynosi ok. 40. Związane jest to z przyjętą strukturą niezawodnościową z rezerwą nieobciążoną oraz parametrami niezawodnościowymi tych elementów. Poza tym założono, że czas podstawiania elementu rezerwowego, jest praktycznie równy zeru.

RS FCI jest względną miarą ukazującą udział liczby niezdatności danego, elementu odniesionej do liczby niezdatności systemu w analizowanym okresie eksploatacji. W ogólnym ujęciu, wskaźnik RS FCI wyznacza się z poniższej zależności:

$$RS\ FCI = \frac{F_{ZD}}{N_F}$$

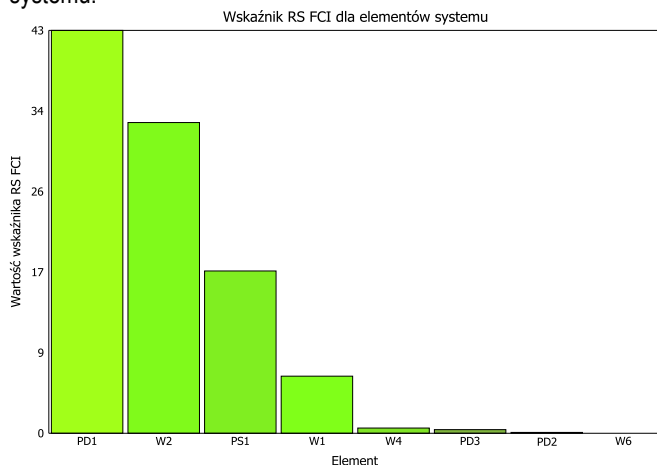
gdzie:

- $C_{NSDE}$  – liczba niezdatności systemu spowodowana niezdatnością danego elementu.
- $N_F$  – liczba wszystkich niezdatności systemu.



Rys. 8. Wykres wskaźnika RS DECI dla elementów systemu

Wykres wskaźnika RS FCI dla elementów systemu został przedstawiony na rys. 9. Jak wynika z załączonego wykresu, zarejestrowana w trakcie symulacji czasu pracy liczba niezdatności systemu, spowodowana jest w największym stopniu przez element PD1 (ok. 43%). Pozostałe elementy, których również okazują się być słabymi ogniwami to W2 (ok. 33%), PS1 (ok. 17%), a także element W1, który wpływa niekorzystnie również na czas przestoju systemu.



Rys. 9. Wykres wskaźnika RS FCI dla elementów systemu

## PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonej analizy niezawodności systemu transportowego z zastosowaniem drzewa niezdatności i symulacji Monte Carlo, otrzymano wartości wybranych wskaźników, mogących służyć do wyznaczenia prawdopodobieństwa uszkodzeń elementów tego systemu w trakcie eksploatacji. Zaproponowane podejście pozwala na jakościową i ilościową ocenę niezawodności, identyfikację słabych ogniw i może stać się podstawą do opracowania strategii utrzymania prewencyjnego. Opracowany model systemu transportowego może podlegać dalszej rozbudowie do osiągnięcia wymaganego poziomu szczegółowości. Wykorzystany pakiet oprogramowania firmy Reliasoft niewątpliwie przyczynia się do ułatwienia wykorzystania technik symulacyjnych, szczególnie w przypadku systemów w wysokim stopniu złożoności.

## BIBLIOGRAFIA

1. S. Amari, G. Dill, E. Howald, "A new approach to solve dynamic fault trees," In: Annual IEEE reliability and maintainability symposium, 2003, pp. 374-389.
2. M. Cepin, B. Mavko, "A dynamic fault tree," Reliability Engineering and System Safety 75(2002), pp. 83-89.
3. K. Durga Rao, V. Gopika, V.V.S. Sanyasi Rao, H.S. Kushwaha, A.K. Verma, A. Srividya, "Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment," Reliability Engineering and System Safety 94 (2009), pp. 872-883.
4. M. Szkoda, "Assessment of reliability, availability and maintainability of rail gauge change systems," Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 16, no. 3, pp. 422-432, 2014.
5. T. Gajewska, G. Kaczor, "Analiza niezawodności dostaw w transporcie chłodniczym," Logistyka 5/2014, pp. 453-462.
6. G. Manno, F. Chiacchio, L. Copmagnò, D. D'Urso, N. Trapani, "An integrated Monte Carlo Simulink tool for the reliability assessment of dynamic fault tree," Expert Systems with Applications 39 (2012), pp. 10334-10342.
7. M. Marseguerra, E. Zio, "Monte Carlo estimation of differential importance measure: application to the protection system of a nuclear reactor," Reliability Engineering and System Safety 86(2004), pp. 11-24.
8. G. Kaczor, "Modelowanie i ocena niezawodności systemu transportu intermodalnego," Logistyka 3/2015, pp. 2047-2054.
9. M. Kowalski, J. Magott, T. Nowakowski, S. Werbńska-Wojciechowska, "Analysis of transportation system with the use of Petri nets," Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 13, no. 1, pp. 48-62, 2011.
10. T. Nowakowski, "Niezawodność Systemów Logistycznych," Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2011.
11. T. Nowakowski, "Reliability model of combined transportation system. Probabilistic safety assessment and management," Proceedings of the European Safety and Reliability Conference PSAM7-ESREL 2004. London [etc.], Springer.
12. T. Nowakowski, M. Zajac, "Analysis of reliability model of combined transportation system," Advances in Safety and Reliability – Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2005, pp. 147-151.
13. A. Peng, Y. Lu, A. Miller, C. Johnson, T. Zhao, "Risk assessment of railway transportation system using timed fault tree," Quality and Reliability Engineering International, John Wiley & Sons, 2014.
14. S.H. Stroeve, H.A.P. Blom, G.J. Bakker, "Systematic accident risk assessment in air traffic by Monte Carlo simulation," Safety Science 47 (2009), pp. 238-249.
15. A. Volkanowski, M. Cepin, B. Mavko, "Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability," Reliability Engineering and System Safety 94(2009), pp. 1116-1127.
16. S. Werbńska, "Model of logistic support for exploitation system of means of transport," PhD Thesis, Technical University of Wrocław, Poland, report: PRE 3/2008.
17. J. Faulin, A. A. Juan, S. Matrorell, J-E. Ramirez-Marquez "Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems," Springer-Verlag London Limited, 2010.
18. ReliaSoft Corporation "System Analysis Reference". Tucson, USA. ReliaSoft Publishing, 2010.

## Reliability assessment of the transportation system using Dynamic Fault Tree (DFT) and Monte Carlo simulation methods

*The presented paper focuses on the need for modelling of the transportation systems in terms of the reliability assessment. Taking into account the time dependencies between the elements of the system in order to develop the more accurate model needs to choose the appropriate analysis method. One of the methods is Dynamic Fault Tree Analysis (DFTA), which extends the classical Fault Tree Analysis (FTA) by adding the logical gates with time dependencies. Due to the sophisticated calculation procedures, DFT may be difficult to solve it analytically. For this reason the simulation methods are often applied, such as the Monte Carlo Simulation method. It is commonly used for assessing the reliability of the*

*technical objects, but in the case of the complex systems it is supported by a specialized software. This work is aimed at reliability assessment of the given transportation system. Created Dynamic Fault Tree of the system was solved using the Monte Carlo Simulation method. We obtained the selected measures, which can be used to assess the reliability. Performed Calculations were supported by the Reliasoft's software.*

Autorzy:

dr inż. **Maciej Szkoda** – Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Szynowych,  
e-mail: maciej.szkoda@mech.pk.edu.pl  
mgr inż. **Grzegorz Kaczor** – Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Szynowych,  
e-mail: gkaczor@pk.edu.pl